DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.06.033

联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验^{*}

周利明1 张小超1 刘阳春2 苑严伟2

(1. 中国农业机械化科学研究院机电技术应用研究所,北京 100083;

2. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室,北京 100083)

【摘要】 实时监测谷物收获时的损失率具有重要意义。采用聚偏二氯乙烯(PVDF)压电薄膜作为传感器敏感 材料,设计了阵列式 PVDF 传感器及相应的信号调理电路,同时利用该传感器得到了籽粒损失的空间分布。分别 选择 3 种不同含水率的水稻籽粒进行试验并给出了试验测试结果,结果表明不同含水率的水稻样品,传感器的测 量误差均在 5% 左右。

关键词:联合收获机 谷物 损失 阵列传感器 PVDF 薄膜 中图分类号: S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)06-0167-05

Design of PVDF Sensor Array for Grain Loss Measuring

Zhou Liming¹ Zhang Xiaochao¹ Liu Yangchun² Yuan Yanwei²

Institute of Mechatronics Technology and Application, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China
 State Key Laboratory of Soil, Plant and Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,

Beijing 100083, China)

Abstract

The online monitoring of grain loss was important for improving the effect of harvest. Based on the requirement of measurement, the polyvinyliden fluoride(PVDF) piezoelectric-film was applied to develop a novel grain loss sensor array. The design of conditioning circuit was also discussed. The spatial distribution of grain loss could be easily obtained by proposed sensor array. Three kinds of full rice seeds with different moisture were prepared for the experiment, and the results indicated the measuring error of the sensor were within 5%.

Key words Combine harvester, Grain, Loss, Array sensor, PVDF-film

引言

联合收获机在田间作业时,不可避免地会产生 各种谷物损失。实时监测谷物损失对于提高收获作 业的效率和作业质量具有重要意义。

国外联合收获机上所安装的谷物损失传感器通常是在一块长方形或圆形铁板中心位置上安装一片 压电陶瓷,当谷粒下落撞击传感器铁板时,铁板产生 机械振动,经压电陶瓷转变为相应的电脉冲信号,籽 粒信号频率在 40 Hz 左右,对信号进行鉴别处理,从 而得到籽粒量^[1-3]。这种方法一方面限于敏感材料 的类型而不能大幅提高所测撞击频率的上限,从而 影响测量精度;另一方面只能得到传感器有效区域 内的籽粒损失总量,而无法获得其空间分布状况。 目前成型的谷物损失测量装置在国内市场上还很难 见到。谷物损失测量方法还有声学法、微波法^[4] 等。本文采用 PVDF(聚偏二氟乙烯)压电薄膜作为 传感器敏感材料,设计阵列式 PVDF 传感器。

收稿日期: 2009-07-30 修回日期: 2009-10-10

^{*} 国家"863"高技术研究发展计划资助项目(2006AA10A305、2008AA100902)和"十一五"国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11A03、2006BAD11A17)

作者简介:周利明,助理工程师,主要从事精准农业和测控技术研究,E-mail: haibol129@163.com

通讯作者:张小超,研究员,博士生导师,主要从事农业机械自动控制与智能化仪器研究,E-mail: zxc@ caams. org. cn

1 传感器系统设计

谷物损失阵列测量传感器系统主要由 PVDF 阵 列传感器、信号调理部分、通信接口及显示仪表等部 分组成。

1.1 PVDF 阵列传感器原理

传感器以 PVDF 压电薄膜为敏感材料制作而 成。PVDF 压电薄膜作为一种新型的压电高分子材 料,近年来在机器人、结构振动及生物医学领域得到 广泛应用^[5-7]。相比于传统的压电陶瓷,具有更高 的压电电压系数(是压电陶瓷的 10~20 倍);柔顺 性好,便于制成各种形状的大面积传感元件阵列;响 应速度快,具有相当宽的频率范围^[8-9]。

PVDF 传感器正压电效应的压电方程为^[10]

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{dT} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{E} \tag{1}$$

其中 $D = [D_1 D_2 D_3]^{T}$ $T = [T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6]^{T}$ 式中 ε ——介电常数矩阵 E——电场强度 D——电位移矩阵,即面电荷密度矩阵

T——应力 *d*——压电常数矩阵

所用 PVDF 压电薄膜其极化方向为方向 3,即 厚度方向,则压电常数矩阵为

$$\boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

当压电薄膜不置于电场中时

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{dT} \tag{2}$$

 $D_3 = d_{31}T_1 + d_{32}T_2 + d_{33}T_3 + d_{15}T_4 + d_{15}T_5$ 仅考虑方向 3 受均匀的力时

$$D_3 = d_{33}T_3 \tag{3}$$

则由式(3)可得出 PVDF 薄膜产生的表面电荷与所 受压缩力呈线性关系。

阵列传感器由 5 个传感器单元组成,每个单元 为厚 50 μm,有效面积 2 000 mm² 的 PVDF 压电薄 膜,单元间隔 1 mm。由于 PVDF 压电薄膜表面所镀 电极层很薄且易受破坏,因此在上、下表面均粘贴耐 磨的 PET 薄膜(保护膜厚度为 0.1 mm),将整个传 感器单元塑封保护。压电薄膜属于高分子有机材 料,不耐热,无法点焊引出电极,这里采用冷压端子 形式将电极引出,保证了传感器信号输出的可靠。

制成的 PVDF 压电传感器厚度约为 0.3 mm,需 要基板支撑固定,若直接将传感器粘贴于支撑基板 上,籽粒冲击传感器的同时,会对基板产生一定冲 力,该冲力又会反作用于各传感器单元,使得传感器 单元之间相互影响。因此,在 PVDF 传感器下保护 层与支撑基板间粘贴 2 mm 厚的橡胶层,用于衰减 冲击信号,同时由于橡胶的弹性,也能提高传感器的 形变,增强输出信号。传感器单元结构如图1所示。 图中传感器单元为5层结构:两层PET保护层,中 间是PVDF压力薄膜层,下面为橡胶与铝合金基底 层,起减振和支撑作用。所设计传感器的参数如 表1所示。

 PET 保护层

 PVDF 压电薄膜

 PET 保护层

 橡胶阻尼层

 铝合金基底



图 1 PVDF 传感器单元结构图

Fig. 1 Unit structure of PVDF sensor

表1 PVDF 阵列传感器参数

Tab. 1 Parameters of the PVDF array sensor

参数	数值	参数	数值
阵列单元数	5	压电常数/C・N ⁻¹	21×10^{-12}
传感器单元长度/mm	110	密度/kg·m ⁻³	1.8
传感器单元宽度/mm	20	电容/µF	3. 2 × 10 $^{-3}$
总有效面积/mm ²	10 000	温度范围/℃	$-40 \sim 80$

注:传感器单元包括 10 mm 的电极引线端子,属于非有效作用 区域,因此有效长度为 100 mm。

1.2 信号处理电路设计

由于传感器为阵列结构,为了避免各单元相互 干扰,同时提高测量的响应速度,针对每一个阵列单 元设计了独立的信号处理电路。传感器信号处理电 路主要包括电荷信号转换放大、鉴频检波、脉冲整 形、计数等部分。其结构原理如图 2 所示。



1.2.1 电荷转换放大电路

PVDF 传感器受到籽粒冲击后产生电荷,不能 直接测量,必须经电荷放大装置将其转换为电压信 号后才能进行采集处理。这里选用 TL082 高输入 阻抗运算放大器,并结合前级电阻、电容构成电荷放 大器^[11]。电荷放大电路与压电传感器连接的等效 电路如图 3 所示^[12]。

图 3 中 C_f 为电荷放大器的反馈电容,在其两端



图 3 PVDF 传感器与电荷放大电路相连的等效电路图 Fig. 3 Schematic of PVDF sensor and electricity amplifier

并联一个反馈电阻 R_f , C_a 为传感电容, 其泄漏电阻 是 R_a , C_c 为电缆电容, C_i 放大器的输入电容, R_i 为 放大器的输入电阻, A 为运算放大器的开环增益。

将反馈电容 C_f 折合到放大器输入端的有效电容 C'_f ,即 $C'_f = C_f(1 + A)$ 。若忽略放大器输入电阻 R_f 和反馈电容并联的泄漏电阻 R_a ,则放大器输出的电压为

$$U_{o} = \frac{-AQ}{C_{a} + C_{c} + C_{f} + (1 + A)C_{f}} = AU_{i}$$
(4)

式中 Q——压电薄膜的输出电荷 放大器的输入电压为

$$U_{i} = \frac{-Q}{C_{a} + C_{c} + C_{i} + (1 + A)C_{f}} = \frac{-C_{a}U_{a}}{C_{a} + C_{c} + C_{i} + (1 + A)C_{f}}$$
(5)

由于 $A \gg 1$,则 $(1 + A) C_{f} \gg C_{a} + C_{e} + C_{i}$,这样传 感器自身电容 C_{a} 、电缆电容 C_{e} 和放大器输入电容 C_{i} 均可忽略不计,放大器输出电压可表示为

$$U_{o} = -\frac{Q}{C_{f}} = \frac{d_{33}T_{3}}{C_{f}}$$
(6)

由式(6)可知,电荷放大器输出电压与表面压 力呈线性关系。

设计的电荷转换放大电路如图 4 所示。图中第 1 级为一个带电容反馈的高输入阻抗和高增益的运 算放大器,为达到阻抗匹配要求,选用 TL082 高输 入阻抗运放,结合反馈电阻和电容构成电荷转换电 路,将 PVDF 传感器的感应电荷信号转变为电压信 号。第 2 级为电压放大电路,将转换后的电压信号 进行二次放大,使放大后信号幅值在 -4.5~4.5 V 之间。

1.2.2 鉴频检波电路

放大后的传感器信号中包含有物料信号和一些 高频及工频干扰,需要进一步进行鉴频检波处理。 鉴频电路的截止频率范围为1~5kHz,相比于压电 陶瓷产生的40Hz信号,其响应速度提高了25倍。

在对 PVDF 传感器信号响应分析过程中发现, 由于籽粒冲击传感器所产生的信号为衰减振荡信 号,第1个峰值最大,依次衰减至消失;而籽粒等物



Fig. 4 Schematic of charge amplifier

料由于冲击传感器的方向和位置不同,所产生响应 信号的第1个峰值也不同。这样就会出现某一个籽 粒信号的第2个峰值要大于另外一个籽粒信号的第 1个峰值,从而给后续计数带来不利影响。如果通 过检测压电信号的电压峰值点,对每个峰值进行比 较判断来确定是否为同一籽粒信号则非常复杂,为 此设计了二极管检波模块对 PVDF 传感器输出的压 电脉冲信号进行包络检波,以简化这一工作。鉴频 检波电路如图5所示。



Fig. 5 Frequency discriminating detection circuit

经过转换放大后的物料感应信号进入由 R_1 、 C_1 构成的第1级低通滤波器,上限截止频率为5 kHz, 以使物料信号能够保留。由 C_2 、 R_2 构成第2级高通 滤波器,下限截止频率为1 kHz,籽粒信号保留,其他 信号被滤掉。经过滤波处理后的传感器感应信号 U_i 进入由二极管 D、电阻 R 和电容 C 构成的检波模 块:在其正半周,D 导通,C 开始充电。充电时间常 数 $R_dC(R_d$ 为二极管正向导通电阻)很小,使 C 的电 压 U_a 很快达到 U_i 的第1个正相峰值 V_p ,之后 U_i 开 始下降, $U_a > U_i$ 时 D 截止,C 开始放电,因放电时间 常数远大于输入信号的周期,故放电很慢, U_a 下降 不多时 U_i 达到第2个正相峰值 V_p 。D 又导通,继续 对 C 充电。这样不断循环,便得到信号包络波形。 图 6 为包络处理前后的籽粒信号。

经过二极管包络检波处理后,籽粒冲击产生的 衰减振荡脉冲串信号转变为单个正脉冲信号,大大 提高了计数的准确性。

检波后的信号进入由电压比较器 LM339 构成 的迟滞比较电路进行脉冲整形。该电路设置比较电 压上限阈值和下限阈值,通过改变阈值可以调节传 感器的灵敏度,由于电压门限的存在,使检波脉冲的 局部干扰得到抑制。整形后的脉冲信号为标准方 波,将该信号送入高速计数器 82C54 进行脉冲计



数,从而得到损失的籽粒量。

单片机将计算得到的籽粒量,通过 RS232 串行 接口送入二次显示仪表,切换显示单位时间籽粒量 和总籽粒量。

整个传感器系统置于一机壳内,机壳上表面为 PVDF 阵列传感器,信号处理电路位于传感器基板 下,传感器与信号处理电路直接相连。系统与外部 接口仅有电源和数据通信接口。这样整个传感测量 装置将阵列传感器与信号处理电路、接口电路集于 一体。这种结构可以避免传感器信号在经过长线传 输时引入外界干扰,从而使系统抗干扰性能得到有

表 2

效提高。

2 试验及结果分析

为了检测利用 PVDF 阵列传感器测量谷物损失 的可行性与准确性,在室内谷物损失测量台架上进 行了传感器的性能测试试验。

2.1 PVDF 传感器准确性测试

试验材料:从3种不同含水率的水稻籽粒中分别选取1000粒作为试验样品,其含水率分别为15.1%,18.32%和23.19%;千粒质量分别为28.1、30.4、32.6g。

试验方法:以电磁振动下料器喂料来模拟联合 收割机的物料下落过程。将样品放入振动下落器 中,调节振动器的励磁电流,使籽粒按一定速度下 落,下落速度为100粒/s。通过调整籽粒下落的高 度以及传感器的安装角度,使之处于恰当位置,重复 进行3次试验,比较传感器测量的籽粒数与实际籽 粒数,结果如表2所示。

从表 2 中可看出,针对不同含水率的水稻样品, 损失传感器的测量误差能限制在 5% 左右。通过适 当调整传感器的安装位置,可以保证传感器对于不 同含水率的样品均具有较好的适应性。

试验序号	样品	样品1(含水率15.1%)		样品 2(含水率 18.32%)		样品 3(含水率 23.19%)			
	实际值/粒	测量值/粒	误差/%	实际值/粒	测量值/粒	误差/%	实际值/粒	测量值/粒	误差/%
1	1 000	1 057	5.7	1 000	989	- 1. 1	1 000	959	-4.1
2	1 000	1 058	5.8	1 000	1 039	3.9	1 000	961	- 3.9
3	1 000	1 051	5.1	1 000	952	- 4.8	1 000	982	-1.8
下落高度/mm		225			215			182	
安装角度/(°)		34			45			44	

Tab. 2 Sensor veracity test with samples of different moisture

不同含水率样品的传感器准确性测试结果

2.2 传感器的空间分布测量试验

试验材料:选取1000粒水稻籽粒,其含水率为15.1%,千粒质量为28.1g。

试验方法:将水稻籽粒样品放入振动给料器中, 调节振动器的励磁电流,使籽粒按一定速度下落,下 落速度约为100粒/s。重复进行3次试验,观察各 个通道的测量值,结果如表3所示。



Tab. 3 Testing data of sensor distribution measurement

							粒
试验	通送1	汤送)	通送 2	通道 4	汤	测量	实际
序号	週担 I	週担 Z	週退 3	週担 4	週担 3	总数	总数
1	58	223	151	393	77	902	1 000
2	79	210	127	397	110	923	1 000
3	85	234	157	372	98	946	1 000

注:由于试验主要测试传感器的空间分布测量性能,因此并未特 意将传感器置于最佳安装位置。 从表 3 中可以看到,各个通道 3 次测量的数据 变化不大,表明传感器具有较好的重复性。而且能 够有效地测量各个通道的籽粒损失量,结合传感器 的尺寸即可得到传感器作用区域内籽粒的空间分布 信息。其空间分布如图 7 所示。



3 结束语

采用 PVDF 压电薄膜制作了阵列式传感器,并 设计了相应的信号调理电路,将其应用于谷物损失 测量中,并对传感器性能进行了室内测试。测试结 果表明该传感器具有较高的测量精度和响应速度, 重复性较好,并能获取籽粒的空间分布信息。

参考文献

- 李俊峰,介战.联合收割机谷物损失测试研究探讨[J].农机化研究,2007,29(12):248~250.
 Li Junfeng, Jie Zhan. Analyses of combine harvester grain loss measurement [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(12):248~250. (in Chinese)
- 2 JB/T5672—1991 谷物联合收割机损失监视仪[S].
- 3 Osselaere, Guy H J. Offset grain loss sensor for combine harvesters: US, 4540003[P]. 1985-09-10.
- 4 Kotyk W M, Kirk T G, Wilson R J, et al. Unthreshed head grain loss monitor: US,4825146[P]. 1989-04-25.
- 5 Byungjune Choi, Hyouk Ryeol Choi. Development of tactile sensor for detecting contact force and slip [C] // IEEE/RSJ Internation Conference on Intelligent Robots and System, Canada, 2005: 2638 ~ 2643.
- 6 Gonzalez Moran, Gonzalez Ballesteros co, Gomez R S. Polivinylidene difluoride (PVDF) pressure sensor for biomedical application[C] // Proceedings of 1st International Conference on Electrical and Electronics Engineering (2004 ICEEE), 2004: 473 ~475.
- 7 Gu Hua, Zhao Yang, Wang Ming L. A wireless smart PVDF sensor for structural health monitoring [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2005, 12(3~4): 329~343.
- 8 舒方法,姜寿山,张欣,等. PVDF 压电薄膜在足底压力测量中的应用[J].压电与声光,2008,30(4):514~516. Shu Fangfa, Jiang Shoushan, Zhang Xin, et al. Application of PVDF piezoelectric-film to foot-pressure measurement[J]. Piezoelectectrics & Acoustooptics, 2008,30(4):514~516. (in Chinese)
- 9 Andrzej odon. Probe with PVDF sensor for energy measurements of optical radiation [J]. Measurement Science Review, 2003(3):111~114.
- 10 王国力,赵子婴,白金星. PVDF 压电薄膜脉搏传感器的研制[J]. 传感技术学报,2004,12(4):688~692.
 Wang Guoli, Zhao Ziying, Bai Jinxing. Design and implementation of the three point PVDF piezo-film sphygmo-transducer
 [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2004,12(4):688~692. (in Chinese)
- 11 刘昭博,彭光正.基于 PVDF 压电薄膜灵巧手触觉传感器的研究[J].传感器世界,2007(11):11~14.
 Liu Zhaobo, Peng Guangzheng. The study of tactile sensor of dexterous hand based on PVDF piezo-film[J]. Sensor World, 2007(11):11~14. (in Chinese)
- 12 具典淑,周智,欧进萍. PVDF 压电薄膜的应变传感特性研究[J]. 功能材料, 2004, 35(4):450~452.
 Ju Dianshu, Zhou Zhi, Ou Jinping. Study on strain sensing of pvdf films [J]. Functional Materials, 2004, 35(4): 450~452. (in Chinese)

(上接第127页)

- 14 Mitsuhiko Sato, Sumie Yokoyam, Tomokazu Koshiba, et al. γ-irradiation damage to leaf vacuole membranes of chelidonium majus[J]. Environmental and Experimental Botany, 1995,35(1):71 ~ 81.
- 15 于勇,王俊,王爱华,等.⁶⁰Co γ 射线辐照处理对晚粳稻低温干燥特性的影响[J]. 核农学报, 2005, 19(1): 41~45.
 Yu Yong, Wang Jun, Wang Aihua, et al. Influence of γ-irradiation on low temperature drying of *Japonica* rice[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2005, 19(1): 41~45. (in Chinese)
- 16 于勇, 王俊, 王爱华, 等.⁶⁰Coγ射线辐照预处理对小麦干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 145~149.
 Yu Yong, Wang Jun, Wang Aihua, et al. Effect of ⁶⁰Co-gamma irradiation pre-treatment on drying characteristic of wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(5): 145~149. (in Chinese)
- 17 宋洪波,安凤平.胡萝卜过热蒸汽膨化干燥工艺优化[J].农业机械学报,2010,41(2):127~131. Song Hongbo, An Fengping. Optimization of super heated stream puffing drying technology for carrot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(2):127~131. (in Chinese)